

Einstürze von Bauwerken - Fakten, Ursachen, Folgen

Scheer, Joachim

Veröffentlicht in:
Abhandlungen der Braunschweigischen
Wissenschaftlichen Gesellschaft Band 48, 1997,
S.133-166



Verlag Erich Goltze KG, Göttingen

Einstürze von Bauwerken – Fakten, Ursachen, Folgen

Von **Joachim Scheer***, Braunschweig

1 Einleitung

Die erste und die letzte Strophe des Gedichtes „Die Brücke am Tay“ von Theodor Fontane, geschrieben nach der Einsturzkatastrophe der Eisenbahnbrücke über den Forth of Tay im Jahr 1879 (Abb. 1), beginnen mit der Frage der Hexen aus Shakespeares Macbeth: „*Wann treffen wir drei wieder zusamm’?*“ und enden mit

„*Tand, Tand*
ist das Gebilde von Menschenhand!“

Im Gedicht planen die Hexen als personifizierte Naturgewalten ihre Zusammenkunft „um die siebente Stund“, am Brückendam“, um die Brücke über den schottischen Fjord zum Einsturz zu bringen. Und sie planen in der letzten Strophe zugleich ihre spätere grausige Bilanz:

„*Ich nenn’ Euch die Zahl.*“
„*Und ich die Namen.*“
„*Und ich die Qual.*“

Die durch einen Sturm ausgelöste Katastrophe bringt 100 Jahre nach dem Bau der ersten Eisenbrücke der Welt, der Coalbrookdale-Bogenbrücke über den Severn in Wales (Abb. 2), allen 90 Insassen des gerade passierenden Zuges den Tod. Das Gedicht von Fontane ist nur ein Beispiel für die weltweiten Reaktionen auf das Desaster. Wir zitieren es im Bewußtsein von Gefahren, die mit Gebilden von Menschenhand verbunden sind, oder wenn sich von Menschen Geschaffenes nicht als dauerhaft erweist: dann liegt uns Fontanes „*Tand, Tand ...*“ auf der Zunge.



Abb. 1:
Einsturz der Brücke über den Forth of Tay

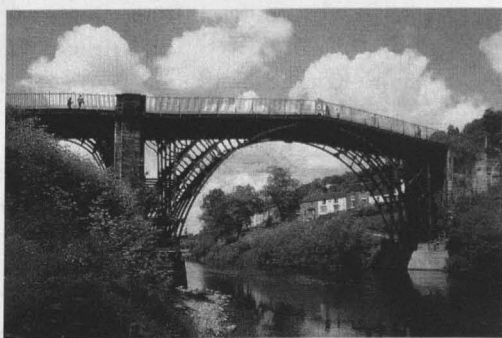


Abb. 2:
Brücke über den Severn 1779

* Univ. Prof. em. Dr.-Ing. Dr.-Ing. E.h. J. Scheer, Institut für Stahlbau, TU Braunschweig, Postfach 3329, 38023 Braunschweig

Max Eyth beschreibt in „Hinter Pflug und Schraubstock“ [1], wie er mit dem Vater des Lokomotivführers im Morgengrauen die Katastrophe im Forth of Tay erkennt:

„Wenn man bedenkt, was jetzt alles unten liegt! ... Auch ein Wagen erster Klasse. – Ja, ja, auch erster Klasse!“

*Es ist alles **eine** Klasse, wenn der allmächtige Gott Brücken umbläst. Aber ich fürchte, man wird sie wieder aufbauen!“*

Leider sind Bauingenieure von Versagen ihrer Bauwerke oft – zu oft – betroffen, dies wird vielfach durch anschließenden Wiederaufbau in unser aller Erinnerung ausgelöscht. Wir Bauingenieure müssen – dies im Gegensatz zu unseren Kollegen aus dem Maschinenbau oder der Elektrotechnik – im allgemeinen Unikate bauen. Uns ist verwehrt, die Tragsicherheit unserer Bauwerke an einem Musterbauwerk unmittelbar zu testen. Wir sind vielmehr darauf angewiesen, das Tragverhalten aufgrund unserer Erfahrungen und mit Hilfe von Modellen zu beurteilen, dabei müssen wir oft in Neuland extrapolieren und damit zwangsläufig außerordentliche Risiken tragen [2].

Immer gaben Baumeister ihre Erfahrungen an die nächste Generation weiter. Sie umfaßten auch das, was Bauunfälle sie gelehrt hatten. Der Fortschritt wurde und wird so nicht nur durch epochemachende Schritte phantasiereicher Baumenschen bewirkt, sondern ebenso durch Katastrophen gebremst und vor Fehlentwicklungen bewahrt.

Man sollte meinen, daß mit dem Hinzukommen der Bauwissenschaften zum Wissen aus der Erfahrung – der Mutter der Weisheit – etwa seit der Mitte des 18. Jahrhunderts Bauunfälle seltener geworden wären. Leider ist das nicht der Fall: Zahlreich sind auch in neuerer Zeit Meldungen über Mängel, Schäden und Einstürze von Bauten. Wir alle, nicht nur die Baumenschen, erinnern uns, wie uns das Versagen von Bauten immer wieder erschreckt hat. Ich will hier nur an zwei erinnern:

- die Brücke zur Insel Tjörn (Bogenbrücke, $L = 278$ m) über den Askero-Fjord in Schweden 1980 (Abb. 3 und 4) durch die Havarie eines Schiffes
- die Kongreßhalle in Berlin 1980 (Abb. 5) durch den Bruch von Spannbewehrungsdrähten

Nach wie vor müssen wir offensichtlich mit dem Einsturz von Bauwerken leben. Dies machte uns erst im September 1996 der Zusammenbruch des 164 m hohen Funkmastes Langenberg des Westdeutschen Rundfunks und Anfang November 1996 der eines Lehrgerüsts bei Diez an der Lahn bewußt.

Weit entwickelte Kenntnisse über das Verhalten von Baustoffen und Baugrund, der hohe Stand der Kenntnisse über das Tragen von Bauwerken oder Bauwerksteilen und damit der Nachweismethoden, die gewaltige Hilfe der Computer bei der Rechenarbeit und immer weiter getriebene Regelungen durch Normen haben nicht bewirkt, das Risiko von Schäden bis hin zum Einsturz nachhaltig zu verringern.

Nachfolgend werden einige Einstürze von Bauwerken beschrieben, und bei den meisten wird etwas zur Ursache und den Folgen gesagt. Dabei wird vermieden, allzu oft erwähnte Katastrophen, wie z.B. den Einsturz der Tacoma-Brücke 1942 in den USA, einzubeziehen, um Bekanntes möglichst nicht zu wiederholen.

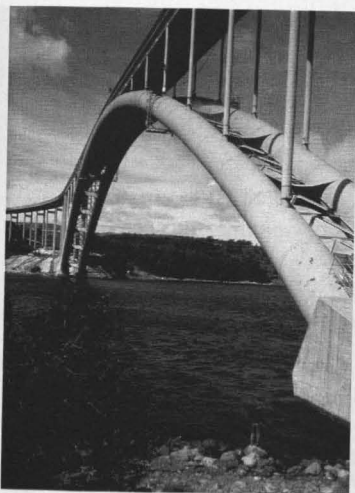


Abb. 3: Brücke zur Insel Tjörn über den Askero-Fjord in Schweden

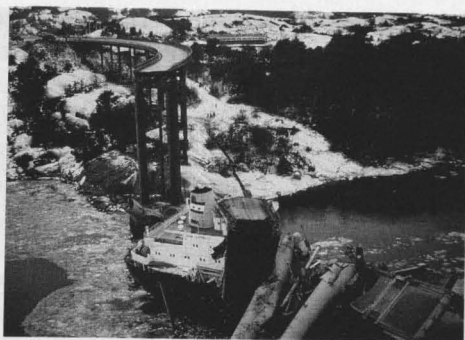


Abb. 4: Einsturz der Tjörnbrücke durch Havarie eines Schiffes



Abb. 5: Dacheinsturz der Kongreßhalle in Berlin

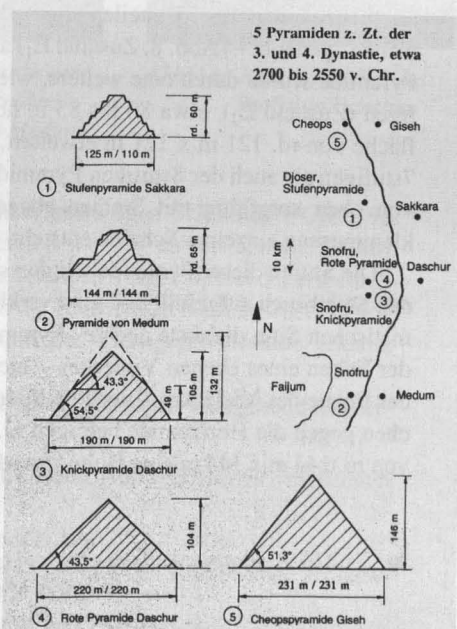


Abb. 6: 5 ägyptische Pyramiden

Auf Fragen von Schuld für Katastrophen wird nicht eingegangen, dafür sind Juristen zuständig, Ingenieure können ihnen nur durch die sachliche Schilderung von Fakten und Erläuterungen der technischen Zusammenhänge helfen.

Die nachfolgenden Ausführungen betreffen zunächst den Bau der ägyptischen Pyramiden vor etwa 4600 Jahren. Sie springen über etwa 4000 Jahre zu einem Gerüsteinsturz im 14. Jahrhundert, beschreiben, vor fast 600 Jahren beginnend, Versagen von Türmen, dann das von Masten und danach Brückeneinstürze.

2 Folgen des Einsturzes einer ägyptischen Pyramide (oder von Schäden an einer solchen) vor etwa 4600 Jahren [3 bis 6]

Im alten ägyptischen Reich wurde in der Zeit der 3. Dynastie etwa 2700 v. Chr. mit dem Bau monumentaler Königsgräber als Symbol der Macht des zentralen Königstums begonnen. Sie entwickelten sich aus den Ziegelmastabas zu den steinernen Pyramiden, die ausnahmslos auf dem Wüstenplateau westlich des Nils oberhalb der heutigen Stadt Kairo errichtet wurden, dies erstaunlicherweise in einer Zeitspanne von nur etwa einem Jahrhundert (Abb. 6).

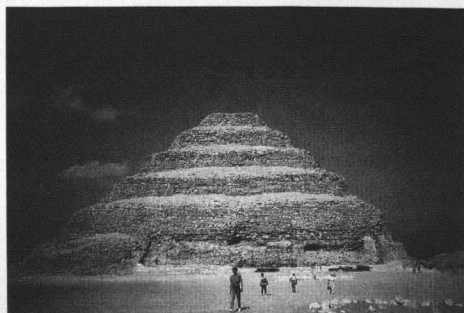
Von ihnen ist die rd. 60 m hohe Stufenpyramide des Königs Djoser (2620–2600 v. Chr.) in Sakkara mit einer rechteckigen Grundfläche von 125 m x 110 m als erster Steinbau der Welt erhalten (Abb. 7).

In der 4. Dynastie baut wenige Jahre später König Snofru zunächst in Medum etwa 50 km weiter südlich eine 7stufige Pyramide. Sie besteht zunächst aus verschieden weit hoch gezogenen, rd. 75° steilen angeordneten Schalen – in der Literatur auch „Strebewände“ genannt – (Abb. 8, Zustand E₁) aus lokal anstehendem Kalkstein. Diese 7stufige Pyramide wurde durch eine weitere, wie die anderen ausgeführte Schale zu einer 8stufigen (Zustand E₂), etwa 80 bis 85 m hohen Pyramide mit einer quadratischen Grundfläche von rd. 121 m x 121 m erweitert. – Die Steine der äußeren Schalen sowohl der 7stufigen als auch der 8stufigen Pyramide sind glatt behauen. Die einzelnen Stufen sind von oben sorgfältig mit Steinen abgedeckt, wodurch aber nur eine schwache Verklammerung einzelner Schalen entsteht.

Die Stufen dieser Pyramide wurden später mit Kalkstein aus einem entfernter liegenden Steinbruch aufgefüllt und glatt verkleidet. Dadurch entstand (Zustand E₃) im mathematischen Sinn die erste „echte“ Pyramide: ihre Kanten werden durch die Verbindung der Ecken eines ebenen Vieleckes – hier eines Quadrates – mit einem Punkt außerhalb der Ebene des Vieleckes – der Pyramidenspitze – gebildet. Die Neigungen der Oberflächen gegen die Horizontale betragen rd. 52° und erreichen damit auf einer Grundfläche von rd. 144 m x 144 m eine Höhe von rd. 92 m.

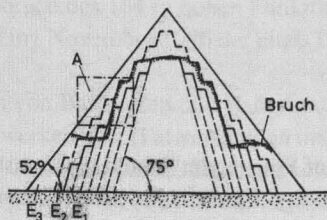
► Abb. 8: Bauzustände der Pyramide des Snofru in Medum

Abb. 7: Stufenpyramide des Djoser in Sakkara

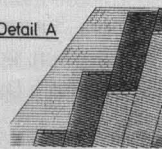


3 Ausbaustufen der Pyramide des Snofru in Medum

E₁ = 7stufiger Ausbau, E₂ = 8stufiger Ausbau, E₃ = „Echte“ Pyramide



Detail A



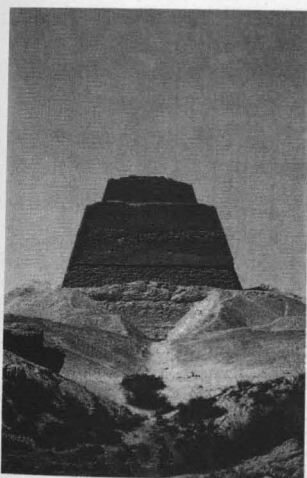


Abb. 9: Heutiger Zustand der Pyramide in Medum



Abb. 10: Bandstruktur in den Bruchflächen der Pyramide in Medum

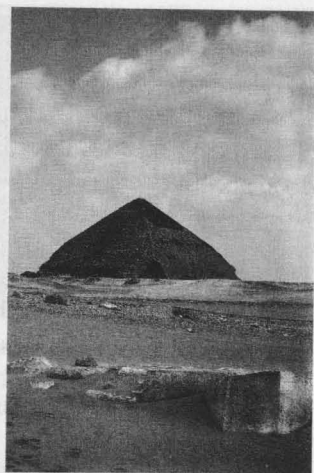


Abb. 11: Knickpyramide des Snofru in Daschur

Heute steht diese Pyramide in Medum in einem gewaltigen Schuttkegel (Abb. 9): Teile der Schalen sind abgestürzt, sie dokumentieren den ersten uns bekannten Einsturz eines Bauwerkes oder eines Teiles davon. Aus den Trümmern ragt ein Rest der ursprünglichen Stufenpyramide heraus, an der man deutlich die bandartigen rauen Bruchflächen zwischen glatten Außenschalen der 7stufigen und der 8stufigen Pyramide erkennt (Abb. 10).

Über die Ursachen für den Einsturz scheint unter Ägyptologen weitgehend Einvernehmen zu bestehen:

- Die z.T. wenig behauenen und daher nicht mit ebenen Auflagerflächen versehenen Steine der Strebewände und
- Setzungen des in Medum schlechten Untergrundes haben
- insbesondere infolge der im Gegensatz zur guten Gründung der Strebewände schlechten Gründung der Außenschale zusammen
- mit dem steilen Neigungswinkel der Schalen von 75° und dem der Pyramienaußenflächen von 52° sowie
- des Fehlens einer kräftigen Verzahnung zwischen den einzelnen Schalen zum Versagen geführt.

Kein Einvernehmen unter den Ägyptologen besteht dagegen offensichtlich über den Zeitpunkt des Einsturzes der Medumpyramide:

- Einige Ägyptologen gehen davon aus, daß die Pyramide in Medum vor der Fertigstellung der äußersten, die Pyramidenform bestimmenden Schale teileingestürzt ist. Sie ziehen daraus für die schon zu dieser Zeit begonnene 2. Pyramide des Snofru in Daschur etwa 30 km weiter nördlich, die sogenannte Knickpyramide (Abb. 11), folgenden Schluß:

Um einem Einsturz dieser neuen Pyramide vorzubeugen, wurde die Neigung von rd. $54,5^\circ$ – es werden auch 52° angegeben – im unteren Drittel der geplanten Höhe auf rd. 43° im oberen Teil zurückgenommen. Die Folgen des Einsturzes der Medum-Pyramide sei somit der Knick bei der daher als Knickpyramide bezeichneten Daschur-Pyramide, die mit Grundrißabmessungen von rd. 190 m x 190 m und einer Höhe von rd. 101 m – ohne Knick wäre sie 135 m hoch geworden – fast die Abmessungen der Cheopspyramide erreicht hätte.

Die dieser Deutung anhängenden Ägyptologen gehen sogar noch weiter: die der Knickpyramide zeitlich folgende, ebenfalls von Snofru errichtete 3. Pyramide, die 2. in Daschur, die sogenannte Rote Pyramide (Abb. 12) – rot wegen des heutigen Fehlens der weißen Decksteine – sei aus dem gleichen Grund vorsichtshalber gleich mit dem kleinen Neigungswinkel von 43° errichtet worden. Diese Pyramide fällt durch ihre flache Neigung auf und mußte Grundrißabmessungen von rd. 220 m x 220 m haben, um 104 m hoch zu werden.

– Andere Ägyptologen gehen davon aus, daß die Medumpyramide erst viel später eingestürzt ist. Sie führen den Knick in der 2. Pyramide des Snofru, der 1. in Daschur, auf bei deren Bau selbst festgestellte Setzungen und Risse zurück und begründen den kleineren Neigungswinkel im oberen Teil mit einer Entlastung des unteren Teiles durch Verringerung der Massen im oberen Teil. – Die Vermutung für die Folgen für die Rote Pyramide sind allerdings die gleichen wie bei der 1. Annahme.

Es gilt für beide Versionen: Mit dem kleinen Neigungswinkel bei der roten Pyramide sollten Mängel, die bei der vorhergehenden Pyramide oder bei ihr selbst festgestellt wurden, vermieden werden:

– Mängel bei der Knickpyramide oder der Einsturz der Medumpyramide waren die Lehrmeister für den Bau der Roten Pyramide.

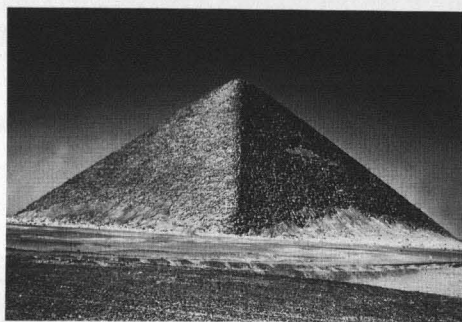


Abb. 12: Rote Pyramide des Snofru in Daschur

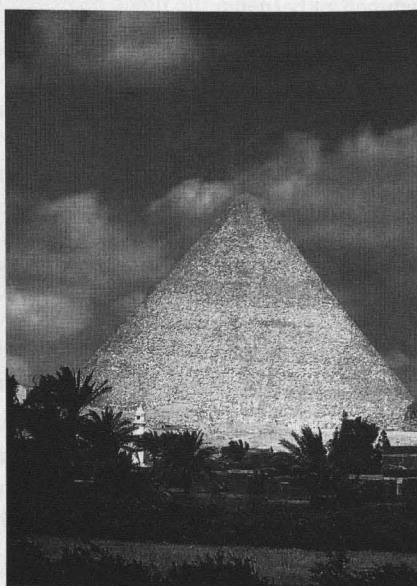


Abb. 13: Pyramide des Cheops in Giseh

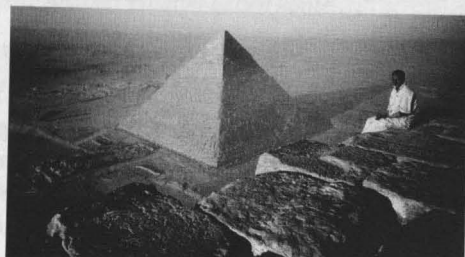


Abb. 14: Pyramide des Kykerinos in Giseh:
Qualität und Größe der Mantelsteine



Abb. 15: Cheopspyramide: Qualität der
Strebepfeilersteine

Abb. 16: Cheopspyramide: Qualität der
Steine an der Pyramidenspitze



Interessant ist die Antwort auf die Frage, welche Überlegungen dazu geführt haben können, bei der zeitlich nächsten Pyramide, der des Cheops, eines Sohnes von Snofru, in Giseh mit dem Winkel von rd. 52° wieder deutlich steiler zu werden, womit bei Grundrißabmessungen von 231 m x 231 m die größte Pyramidenhöhe von rd. 146 m erreicht wurde (Abb. 13). Dafür sind

- die Größe der Steine,
- die Qualität ihrer Bearbeitung und
- die Gründung

zu betrachten. – Diskussionen in der Literatur über die Neigung der Steine scheinen mit dem Tragverhalten letztlich doch wenig zu tun zu haben. Denn der Tatsache, daß die Steine der Strebewände aller Pyramiden nach innen geneigt sind, dagegen die bei der Medumpyramide neu hinzukommende Mantelschale horizontale Lagerfugen hat, wird m. E. zu große Bedeutung beigemessen.

Wichtigste und auffallende Änderung gegenüber den vorhergehenden Pyramiden ist die äußerst sorgfältige Ausführung, hier mit Abb. 14 an der Pyramide des Kykerinos gezeigt. Die Qualität der Arbeit erkennt man an den gegenüber den Vorgängerbauwerken deutlich größeren, bis 2,5 t schweren und sehr gut behauenen Steinen nicht nur des Mantels (Abb. 14), sondern auch der Strebewände (Abb. 15), dies bis zur Spitze (Abb. 16), und an der sorgfältigen Gründung des Mantels.

Die Bedeutung gut bearbeiteter ebener Oberflächen der Steine wird deutlich, wenn man sich nebeneinander einen Haufen unbearbeiteter Steine, z.B. Geröll, und den aus gut bearbeiteten quaderförmigen Steinen oder Mauerziegeln vorstellt: der erste kann nicht beliebig steil aufgeschichtet werden, sondern nur bis zu seinem natürlichen Böschungswinkel. Der zweite läßt sich dagegen – mit gewissen Einschränkungen – auch ohne Mörtel bis zu relativ großen Höhen mit senkrechten Wänden auftürmen.

Typisch für die Folgen auch anderer Einstürze von Bauwerken wird schon hier deutlich: – die Reaktionen auf eine Katastrophe sind zunächst wegen Unsicherheit stark von Übervorsicht geprägt. Erst mit zeitlichem Abstand kann diese Überreaktion nach einer Analyse der Ursachen und dem Finden von Wegen zur Vermeidung von Mängeln ver-lassen werden.

3 Einstürze von Gerüsten

3.1 Einsturz eines Gerüstes beim Bau einer gotischen Basilika

Um das Jahr 1210 wurde in Walkenried mit dem Bau einer „der Macht und dem Reichtum des Klosters entsprechenden“ neugotischen Klosteranlage begonnen [7]. Er sollte so großartig werden, daß er in Deutschland nicht seinesgleichen habe.

Daher gehörte zur Klosteranlage eine über 90 m lange und über 42 m breite gewölbte Basilika mit einem fünfschiffigen Chor [8]. Sie wurde 1290 geweiht, von ihr sind heute nur Ruinen erhalten (Abb. 17).

Im Jahr 1237 oder 1238 stürzte in Walkenried ein Baugerüst ein, 3 Arbeiter kamen dabei um. Wir wissen nichts über die Ursachen, aber einige Folgen können wir den Dokumenten [9] entnehmen, so auch den Ursprung der bis heute erhaltenen sogenannten Johannis- oder Abtskapelle:

„... Die erste von diesen Kapellen ist ... von dem Abte Diederichen im Jahr 1238 erbauet ... worden, ... dazu die Gelegenheit diese gewesen sein soll:

Es habe nämlich um selbige Zeit ... einsmals des Nachts sich ein grausames Gepoltere hören lassen, daß man nicht anders vermeynet, als ob das ganze schon



Abb. 17: Ruine des Klosters Walkenried

ziemlich weit verfertigte Kirchen-Gebäude wieder eingefallen seyn müste, an welchem doch bey anbrechendem Tage nicht der geringste Schade zusehen gewesen,

gleichwohl aber war dieser Lerm ... nicht ohne allen effect, in dem noch selbigen Tages darauf von freyen Stücken das gantze grosse Bau-Gerüste mitten unter der Arbeit eingebrochen ist, und viel Leute theils getödtet, theils sehr beschädiget hat,

darüber auch besagter Abt dermassen erschrocken, daß er lange Zeit gantz lahm sitzen müssen, und wenig bei den Arbeits-Leuten seyn können. Damit aber durch seyne Abwesenheit der Bau nicht gehindert werden möchte, so hat er auf Zureden des damahlig lebenden Grafen von Clettenberg Alberti diese gedachte Capell an berühmtem Orte auf das schleinigste aufführen lassen, damit er in derselben nebst seinen Mönchen vor die Arbeits-Leute so wohl Messe lesen, als auch in selbiger auf den kostbaren Bau desto genauer Obacht geben könnte ...“

3.2 Einsturz eines Gerüstes beim Bau einer Straßenbrücke

Heute werden Einstürze von Bauwerken im allgemeinen gut dokumentiert. Untersuchung der Ursachen schwerer Gerüstkatastrophen, die daraus gewonnenen Erkenntnisse und Änderung der Baubestimmungen haben seit etwa 20 Jahren nachhaltig geholfen, die Anzahl von Gerüsteinstürzen deutlich zu senken, leider nicht, sie vollkommen zu verhindern.

Beispiele in Deutschland für die ab etwa 1960 besonders zahlreichen schweren Gerüsteinstürze auf der ganzen Welt sind:

- Einsturz des Gerüstes für die Wiederherstellung der Autobahnbrücke über die Lahn bei Limburg (Abb. 18 und 19) im Jahr 1961 mit 3 Todesopfern
- Einsturz des Gerüstes für die Leubastal-Straßenbrücke bei Kempten (Abb. 20) mit 9 Toten im Jahr 1973

Wir wollen uns etwas genauer mit dem Einsturz des Lehrgerüstes für den Bau einer Brücke – der Laubachtalbrücke – für die hunsrückseitigen Zubringerstraße zur Rheinbrücke Koblenz (Abb. 21) befassen [10]. Die Brücke war fast fertig, das Gerüst war dafür wiederholt benutzt worden.

Die in Richtung Rhein immer breiter werdende Brücke erhielt ab Achse 90 zwei Pfeiler, deren lichter Abstand wurde von Achse zu Achse größer und verlangte schließlich in Achse 120 eine große Pfeilerkonstruktion (Abb. 22). Der Fußträger, mit dem die Lasten seitlich auf die Pfeilerfundamente abgesetzt wurden, war erforderlich, um die in der Achse der Brücke verlaufende Hauptwasserleitung für die Stadt Koblenz nicht unangemessen zu belasten.

Das Gerüst stürzte am 21. September 1972 ein (Abb. 23): sechs Bauarbeiter kamen ums Leben, neun wurden schwer und sieben leicht verletzt.

Als ich mich im Auftrag des Staatsanwaltes an die Arbeit machte, die Ursache des Einsturzes zu finden, hatte ich in Anbetracht des Trümmerhaufens mit einem Wirrwarr von verbogener Bewehrung und der Vielzahl von möglichen Ursachen zunächst wenig

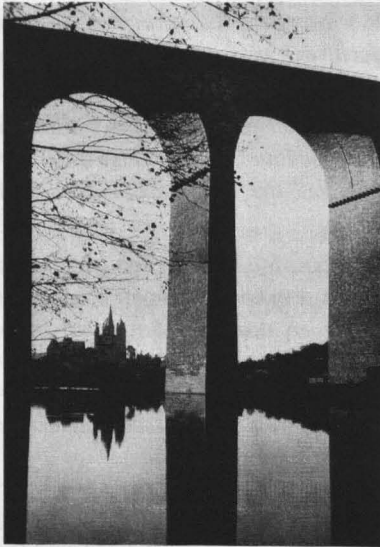


Abb. 18: 1. Autobahnbrücke über die Lahn bei Limburg

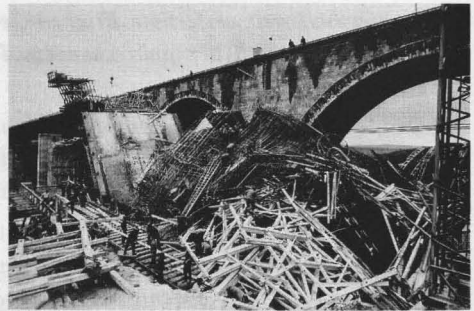


Abb. 19: Einsturz des Traggerüsts beim Bau der 2. Autobahnbrücke über die Lahn bei Limburg

► Abb. 20: Einsturz des Traggerüsts für die Leubastalbrücke bei Kempten

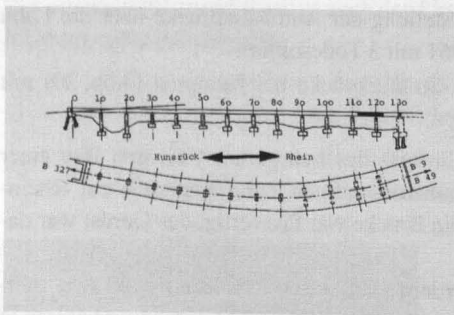
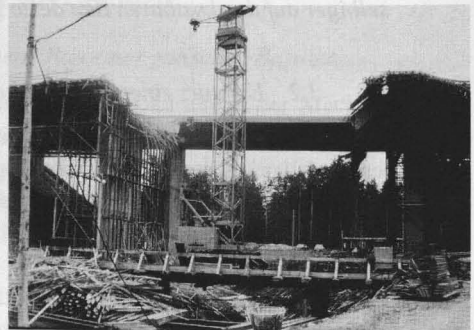


Abb. 21: Laubachtalbrücke: Grundriß des Zubringers zur Rheinbrücke Koblenz

► Abb. 22: Laubachtalbrücke: Konstruktion der Traggerüststützung in Achse 120

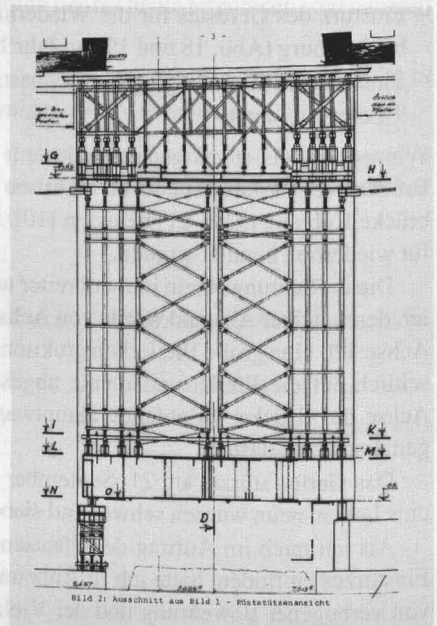




Abb. 23: Laubachtalbrücke: eingestürztes Traggerüst im Feld 110–120



Abb. 24: Laubachtalbrücke: Foto der Stützkonstruktion in Achse 120

Abb. 25:
Laubachtalbrücke:
ausgeführte Aussteifung des Fußträgers
in Achse 120

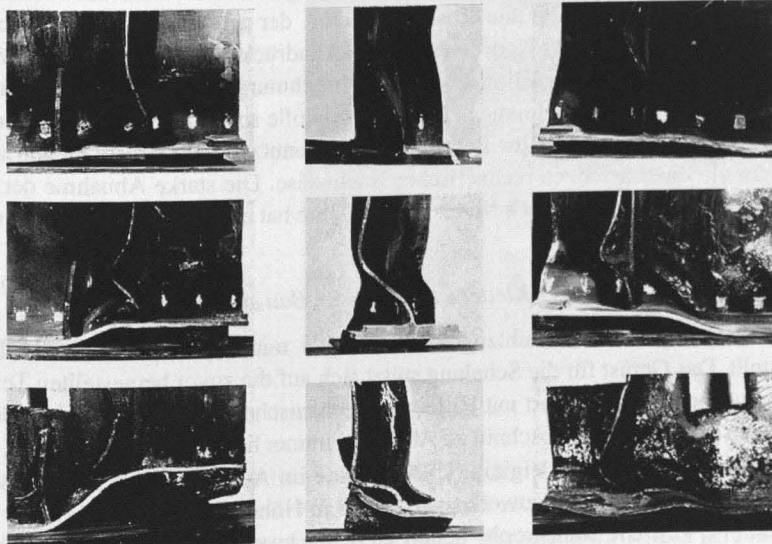
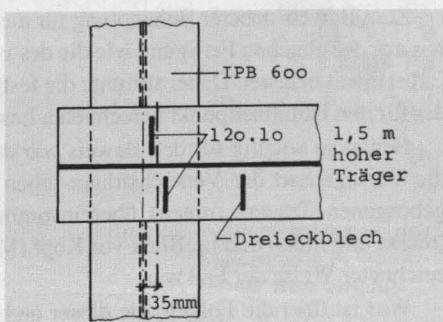


Abb. 26

Laubachtalbrücke: Versagensbild des Fußträgerauflagers
im Vergleich von Versuchen mit der Wirklichkeit

Hoffnung, die Aufgabe lösen zu können. Intensives Studium der Unterlagen für das Gerüst und Anhörungen Beteiligten zusammen mit Beamten der Kriminalpolizei über viele Tage und Nächte ließen den Ablauf des Zusammenbruchs langsam immer klarer werden und engten die Möglichkeiten für die Ursache zunehmend ein. Meine Vermutung und die meiner Mitarbeiter für die Ursache wurde durch eine völlig zufällig erschlossene Quelle erhärtet: in einer Koblenzer Bierkneipe kamen meine Mitarbeiter mit einem Hobby-Fotografen ins Gespräch, der ihnen ein Bild des Gerüstpfelers kurz vor dem Einsturz präsentierte (Abb. 24).

Ich möchte Sie nicht durch technische Einzelheiten langweilen: Ursache für die Katastrophe war letztlich das Fehlen von drei Aussteifungen auf jeder Seite des Fußträgers im Bereich seiner Auflager. Was anstelle der vom Statiker geplanten Steifen vorhanden war (Abb. 25), reichte nicht aus, die vorhandenen Kräfte auf das Auflager zu übertragen.

Zum Beweis unserer Behauptung für die Einsturzursache haben wir zwei Träger, die wir aus der gleichen Fertigung wie die des vorhandenen Trägers bekommen konnten, im Experiment belastet. Dabei stimmte die festgestellte Traglast mit 1700 kN praktisch mit der für den Unfallzeitpunkt berechneten Last am Lager überein.

Genau so wichtig für den Beweis war die Tatsache (Abb. 26), daß im Lagerbereich die Versagensart der Versuchsträger (oben und Mitte) mit der des aus den Trümmern geborgenen Trägers (unten) übereinstimmte. Der Vergleich in den Seitenansichten (rechts und links) und im Blick vor Kopf (Mitte) wird Sie überzeugen, daß das in ausgezeichneter Weise der Fall war.

Was ist über die Folgen, die dieser und andere Gerüsteinstürze ausgelöst haben, zu berichten? Bei den Änderungen von Baubestimmungen in den 70er Jahren standen für uns scharfe Forderungen für die Zusammenarbeit der am Bau Beteiligten im Vordergrund, um Fehler bei der Koordination zurückzudrücken: Regelungen über Verantwortlichkeiten und ihre Delegation, über die Wahrnehmung der Koordinierungsaufgabe, über Anforderungen an Zeichnungen und an Protokolle sowie Kontrollen vom Entwurf über die Ausführung bis hin zur Belastung beim Benutzen der Gerüste hielten wir für wichtiger als Zuschärfungen rechnerischer Nachweise. Die starke Abnahme der Schadensfälle von Traggerüsten nach Mitte der 70er Jahre hat uns offenbar recht gegeben.

3.3 Absturz einer Kletterschalung beim Bau eines Kühlzugturmes

Die Betonschalen von Kühlzugtürmen werden mit Hilfe von Kletterschalungen hergestellt. Das Gerüst für die Schalung stützt sich auf die zuvor hergestellten Teile des Kühlzugturmes ab und klettert mit Hilfe von mechanischen oder hydraulischen Hubeinrichtungen (Abb. 27) von Abschnitt zu Abschnitt immer höher.

In Willow Island, West Virginia (USA), stürzte im April 1978 das Schalungsgerüst für den Bau eines solchen Bauwerkes aus rd. 50 m Höhe ab und riß 51 Arbeiter mit in den Tod [11, 12]. Die Katastrophe gehört zu den schwersten Bauunfällen in den USA überhaupt. Das Gerüst mit 4 Arbeitsbühnen (Abb. 28) war auf jeder Seite mit seinen vertikal angeordneten, rd. 4,5 m langen Trägern im hier rd. 20 cm dicken Beton von drei rd. je 1,5 m hohen Herstellungsabschnitten verankert. Da je Tag ein Ring des Turmes be-

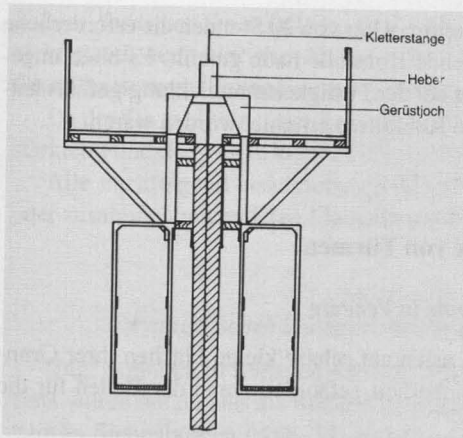


Abb. 27: Prinzip der Kletterschalung bei der Herstellung von Kühlzugtürmen

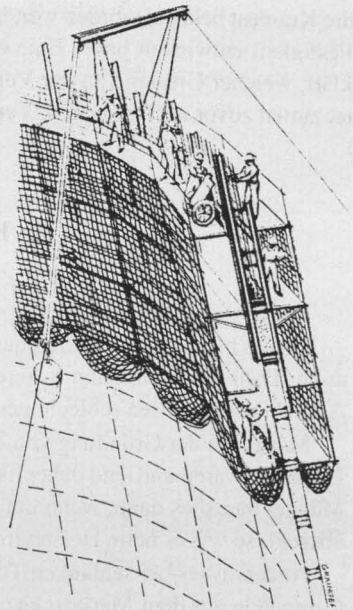


Abb. 28: Kletterschalung für den Kühlzugturm in Willow Island, West Virginia

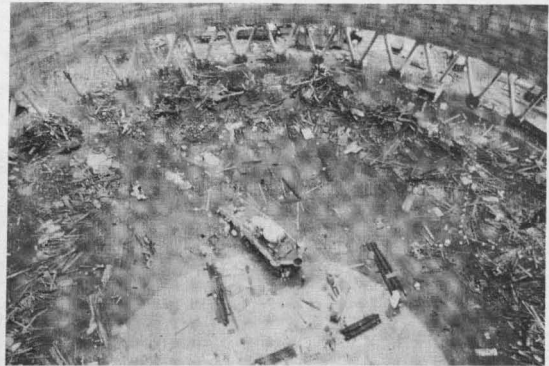


Abb. 29: Abgestürzte Kletterschalung des Kühlzugturmes in Willow Island

toniert wurde, war der Beton an den Verankerungsstellen – von unten nach oben betrachtet – 3, 2 und 1 Tag alt.

Das Gerüst erhielt lokal relativ große Lasten aus den 6 über den Umfang verteilten Anlagen zum Fördern des Betons. Von einer solchen Stelle ging die Katastrophe aus, gerade als ein Betonkübel gezogen wurde. Das lokale Versagen führte nach beiden Seiten zum Abschälen und zum Absturz des ganzen Gerüsts (Abb. 29).

Nach den umfangreichen Untersuchungen ist die Ursache des Gerüstabsturzes vorwiegend darin zu sehen, daß der Beton des obersten Abschnittes durch das Gerüst und

die Kranlast belastet worden war, bevor dieser im Alter von 20 Stunden die erforderliche Festigkeit entwickelt hatte. Eine entsprechende Kontrolle hatte gefehlt. Es blieb ungeklärt, welcher Umstand zu der Verzögerung bei der Festigkeitsentwicklung geführt hatte, zumal zuvor nach gleichem Verfahren 36 Kühltürme errichtet worden waren.

4 Einstürze von Türmen

4.1 Campanile in Venedig

Türme bringen im allgemeinen große Lasten auf relativ kleine Flächen ihrer Gründung. Daher sind sie dann in ihrer Standsicherheit gefährdet, wenn der Boden für die Aufnahme der Lasten schlecht geeignet ist.

Mängel in der Gründung von Türmen wurden früher oft nicht erkannt, Schäden oder Einstürze waren und sind daher häufig. Manchmal bleiben größere Schäden trotz solcher Mängel aus, dies dann, wenn ein breites Bauwerk ohne große Schiefstellung im Boden absackt, so wie es beim Holstentor in Lübeck der Fall ist.

Anders ist es bei schlanken Türmen, wie z.B. dem 1392 fertiggestellten, 99 m hohen Campanile auf dem Markusplatz in Venedig (Abb. 30). Er stürzte 1912, also 520 Jahre nach seiner Errichtung, ohne große Vorankündigung ein. Die gelegentlich beschriebene Ursache „*Neunhundert Jahre Schirokko, angereichert mit Salz und Wüstensand der*

Abb. 30: Campanile in Venedig



Abb. 31: Stadtpfarrkirche in Hermannstadt (Siebenbürgen)

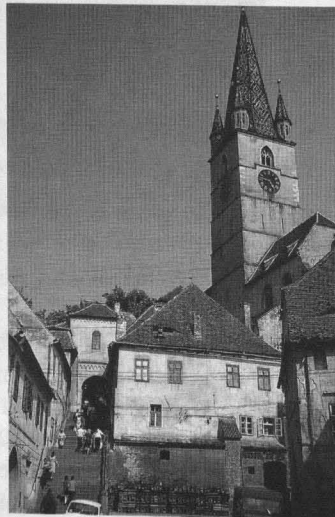


Abb. 32: Wormser Dom Südwestansicht



Sahara, forderten ihren Tribut ...” [13], klingt zwar schön, hält aber einer Nachprüfung nicht stand: auch hier war die Ursache die Gründung, die vielleicht durch veränderte Grundwasserverhältnisse besonders gelitten hatte.

Da der Turm als eines der Zeichen von Venedig nicht fehlen durfte, wurde er mit verstärkten Fundamenten in kurzer Frist wieder aufgebaut.

Alle nachfolgend beschriebenen Schadensfälle von Türmen gehen entweder allein oder zusammen mit anderen Mängeln auf Schwächen ihrer Gründung zurück.

4.2 Nichteinsturz des Turmes der evangelischen Stadtpfarrkirche in Hermannstadt (Siebenbürgen)

Ungewöhnlich ist folgende Absicherung gegen einen Einsturz: Ende des 15. Jahrhunderts wurde die damals als Marienkirche bezeichnete romanische Basilika in Hermannstadt in Siebenbürgen (Abb. 31) zu einer gotischen Kirche, später Stadtpfarrkirche genannt, umgebaut. Über den Baumeister wird berichtet [14]:

„Von der Marienkirche in Hermannstadt, dem gewaltigsten Bauwerk der Stadt, einem der schönsten in Siebenbürgen, wird erzählt, daß der Baumeister davonrannte, ehe er den Umbau der romanischen Basilika zu einem Wunder der Gotik zu Ende gebracht hatte. Seine Flucht dauerte mehrere Jahre. Ihm waren Zweifel gekommen, ob die Fundamente die Kirche überhaupt tragen würden. Da ihn nach ausgiebiger Wartezeit keine Einsturznachrichten erreichten, beruhigte er sich, kehrte zurück und vollendete das Werk, das bereits 1493 seinen Turm mit der Höhe von 73 m erhielt.“

4.3 Einsturz des Nordwestturmes des Wormser Domes, 1429

Es ist wenig bekannt, daß der etwa 1230 fertige Nordwestturm des 1171 begonnenen, 1181 geweihten romanischen Wormser Domes 1429 fast genau 200 Jahre nach seiner Fertigstellung, einstürzte [15]. Über die Ursache ist nichts bekannt, es werden lediglich allgemein Schwächen bei den für die Westtürme vom Vorgängerbau übernommenen Fundamenten vermutet.

Der Turm wurde 1480 neu errichtet. Dabei wurden Umriß, Geschoßteilung und Vertikalgliederung (Abb. 32) nach dem Vorbild des alten, also nach dem des stehengebliebenen romanischen Südwestturmes beibehalten. Deutlich erkennbar im neuen Turm sind aber die der Zeit entsprechenden spätgotischen Elemente.

Folgen des Einsturzes sind hier geringe Unterschiede in der Ausgestaltung der Turmdetails. Im Gegensatz zu heute – man denke nur an die oft aus Gründen des Imponiergehaves errichteten Hochhäuser z.B. in New York und Frankfurt – war die Einordnung in ein größeres Ganzes noch selbstverständlich. Sie erlaubt nur Fachkundigen oder denen, die darauf aufmerksam gemacht werden, die Unterschiede zu erkennen und zu deuten.

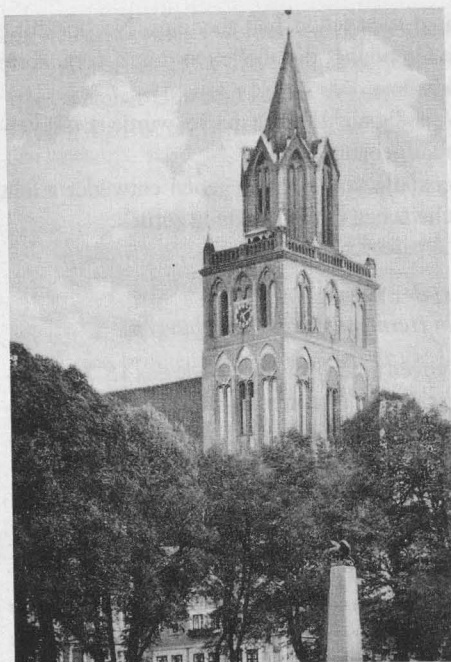


Abb. 33: Marienkirche in Pasewalk

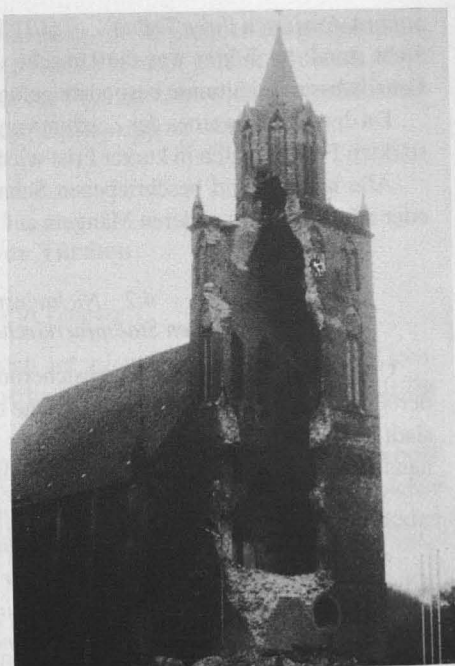


Abb. 34: Marienkirche in Pasewalk:
herausgebrochene Turmecke 1982

4.4 Einsturz des Turmes der Marienkirche in Pasewalk, 1982

Zwischen 1841 und 1863 wurde der Turm der Marienkirche in Pasewalk [16] durch den Architekten Fr. Aug. Schüler restauriert. Er erhielt ein polygonales Obergeschoß (Abb. 33).

1983, also erst 120 Jahre nach dem Umbau, zeigte sich durch das Herausbrechen einer Turmecke (Abb. 34), daß die Turmspitze zu schwer geworden war. Wegen Einsturzgefahr mußte man ein Jahr später den ganzen Turm sprengen.

Auf die Ursache gehe ich nachfolgend im Zusammenhang mit Problemen bei anderen Türmen ein.

Der Turm wurde bald in Beton mit Gleitschalung neu errichtet. Die Denkmalspfleger sorgten dafür, daß er heute so aussieht, wie vor dem Einsturz, – seit der Diskussion um den Wiederaufbau der Frauenkirche in Dresden nennen wir das „postkartengleich“.

4.5 Turm des sogenannten „Deutschen Domes“, Berlin

Einer der schönsten Plätze in Berlin ist der Gendarmenmarkt. Es ist hier nicht der Raum, auf seine interessante Geschichte einzugehen [17]. Dort waren im 18. Jahrhundert den aus Frankreich stammenden Calvinisten ihre französische und den aus der Schweiz

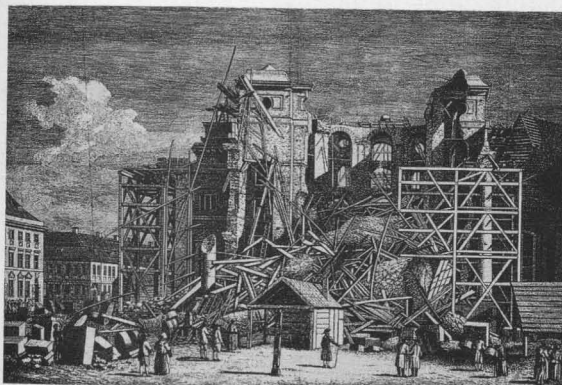
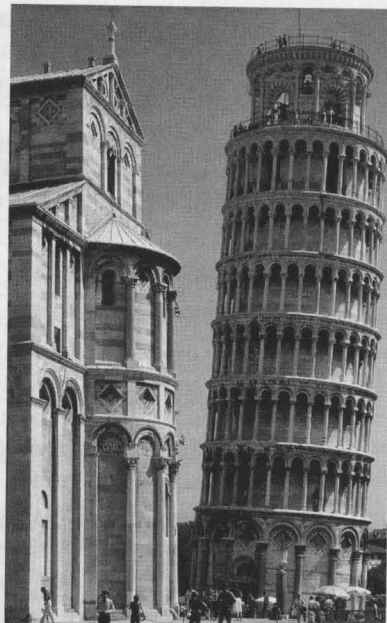


Abb. 35: Einsturz des Turmes des „Deutschen Domes“ am Gendarmenmarkt in Berlin 1781



► Abb. 36: „Schiefer Turm“ in Pisa

eingewanderten ihre deutsche Kirche errichtet worden. Die spätere Neugestaltung des Platzes führte dazu, daß beide Kirchen gleichzeitig im wesentlichen gleiche Türme bekommen sollten. Mit deren Bau wurde 1780 begonnen.

Nachdem die Bauarbeiter beim Turm des deutschen Domes den unteren Rand der Säulentrommel erreicht hatten, stürzte er am 28. Juli 1781 ein (Abb. 35). Zuvor waren Risse beim weitgehend baugleichen Turm der französischen Kirche aufgetreten. Die Dokumente nennen drei Ursachen:

- Mangelhafte Gründung
- Zu schwaches Tambour-Mauerwerk
- Nachlässige Ausführung

Die Folgen waren dreifach:

- Der verantwortliche Architekt v. Gontard wurde entlassen.
- Der Turm des französischen Turmes wurde, da er gleich konstruiert war, weitgehend abgerissen – heute würde man positiv sagen „zurückgebaut“.
- Beide Türme wurden mit verstärkten Fundamenten und Baugliedern wiederaufgebaut und waren 1785 fertig.

4.6 Verhinderung des Einsturzes des „schiefen Turmes“ von Pisa

Die Gefährdung des 58 m hohen „schiefen Turmes“ von Pisa (Abb. 36) ist uns allen bekannt: wir befürchten, daß er sich zunehmend schiefer stellt und mehr oder weniger plötzlich umkippt. Fachleute schlossen dies bis vor Kurzem aufgrund der nach wie vor zunehmenden Neigung nicht aus [29].

Zur Geschichte hier die wichtigsten Daten:

- Baubeginn 1173
- 5 Jahre später: Wegen Schiefstellung Einstellen der Bauarbeiten, 1. Baupause rd. 100 Jahre
- 1272: Herstellen von 3 weiteren Geschossen, aber nach 6 Jahren wieder wegen zunehmender Schiefstellung Einstellen der Bauarbeiten, 2. Baupause rd. 60 Jahre
- Turm 1350 fertig
- Seit 1990 für Besucher gesperrt
- 1992: Bandage eingebaut

Die Zunahme der Schiefstellung bis etwa 1900 ist in etwa bekannt oder kann einigermaßen sicher rekonstruiert werden [18] (Abb. 37). Seit etwa 70 Jahren wird sehr sorgfältig gemessen [19]. Danach betrug 1918 die Schiefstellung $5,36^\circ$ (oder die Auslenkung in 58 m Höhe 5,44 m) Zwischen 1918 und 1989 nahmen die genannten Werte um 2,12 % auf rd. $5,47^\circ$ (5,55 m) zu, also um rd. 0,3 %/Jahr der Schiefstellung von 1918.

Wegen Mangel an Kenntnissen der genauen Bodenverhältnisse kann man die Grenzschiefstellung nur sehr unsicher abschätzen und mit rd. 6° angeben. Bei weiterem linearen Anstieg mit den Werten der letzten 70 Jahre kippt der Turm damit in etwa 300 Jahren um.

Die Konzentration der Fachleute auf die bodenbedingte Schiefstellung hätte beinahe verhindert, eine andere Schwäche des Turmes zu entdecken (Abb. 38) [20, 21]: Am Übergang vom Galerieteil zur Basis – heute in rd. 12 m Höhe über dem Boden – trifft die äußere Natursteinschale des oberen Zylinders mit rd. 2,7 m Wanddicke auf das Füllmaterial des Basiszylinders mit rd. 4,1 m dicken Wänden. Auf der Seite, zu der der Turm geneigt ist, wirken hier wegen der des Treppenganges im Innern und wegen Schiefstellung besonders große Spannungen. Die Spannungskonzentration hatte bereits zu vertikalen Rissen geführt, die erst bei umfangreichen Untersuchungen zwischen 1984 und 1987 entdeckt worden sind. Da ein Mauerwerksbruch vor einem Umkippen des Turmes

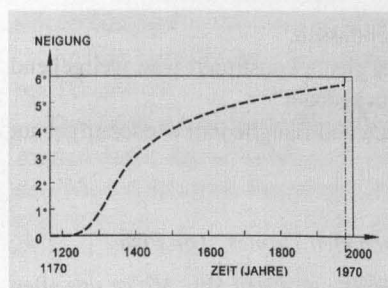


Abb. 37: „Schiefer Turm“ in Pisa:
Zunahme der Schiefstellung
1200–1970

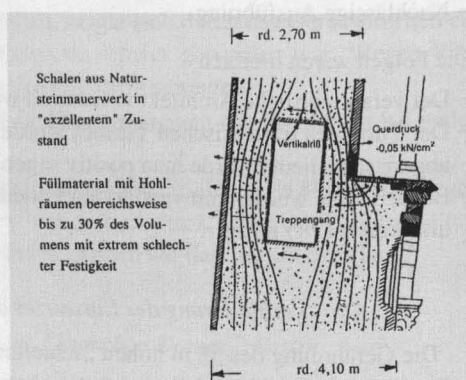


Abb. 38: „Schiefer Turm“ in Pisa: Schnitt
durch Turmwand in rd. 12 m Höhe

nicht auszuschließen war, wurde der schwache Übergangsbereich mit außen umgelegten Bandagen vorgespannt. – Die Schwäche derartiger Bauteile wurde 1989, also nur wenige Jahre später, durch den Einsturz des im 12. Jahrhundert errichteten Stadtturmes in Pavia [22] nachhaltig bestätigt.

Die Schiefstellung nimmt übrigens seit kurzer Zeit nicht mehr zu, nachdem durch Belastung des Fundamentes auf der hochliegenden Seite mit Bleiplatten diese erhöht und die Gegenseite entlastet hat.

4.7 Verhinderung des Einsturzes des Turmes der Dorfkirche in Suurhusen in Ostfriesland

In Suurhusen, wenige Kilometer nördlich von Emden, steht eine im 13. Jahrhundert gebaute Dorfkirche [23]. Sie erhielt um 1450 einen Turm, der auf Eichenbohlen gegründet wurde.

Der Turm ist rd. 27 m hoch und nimmt eine Grundfläche von 11 m mal 11 m ein. Das Grundmauerwerk ist 2 m dick.

Eine Schiefstellung des Turmes wurde erstmals 1885 festgestellt, aber erst 1925 vermessen: die Turmspitze in 27 m Höhe hatte sich um 1,13 m verschoben, das bedeutete eine Schiefstellung von $2,4^\circ$. Um die Gefahr zu reduzieren, hat man 1926 den 12 hohen Dachreiter abgebaut. Dennoch nahm die Neigung schnell weiter zu und hat 1977 fast den doppelten Wert von 1925 mit 2,19 m, d.h. $4,57^\circ$ erreicht (Abb. 39).

Begutachtung, Sanierungsvorschläge und Sanierung zogen sich von 1980 bis 1990 hin. Inzwischen war die Auslenkung auf 2,43 m – $5,07^\circ$ – gestiegen, aber eine weitere Zunahme durch die Sicherung mit Hilfe einer Pfahlgründung seit 1990 gestoppt.

Die Evangelisch-Reformierte Gemeinde zu Suurhusen behauptet – dies sogar mit einem gewissen Stolz – ihr Turm stehe schiefere als der in Pisa! Diese Feststellung geht aber auf falsche Eingangsdaten für die Berechnung der Schiefstellung in Pisa zurück!



Abb. 39: Dorfkirche in Suurhusen

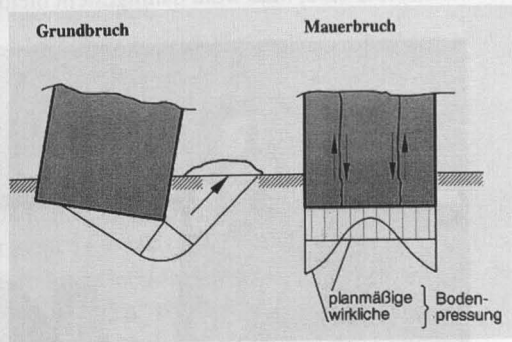


Abb. 40: Grundbruch – Mauerbruch

4.8 Bemerkungen zum Schiefstellen und zum Zusammenbruch turmartiger Bauwerke

Ursache des Einsturzes von Türmen ist im allgemeinen Versagen ihrer Gründung. Hierbei ist zu unterscheiden, ob der Turm umkippt, oder ob sein Schaft versagt.

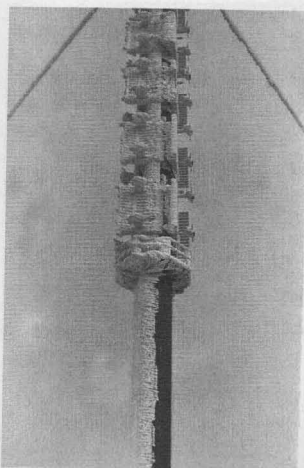
Auf der einen Seite steht der Grundbruch (Abb. 40, links), bei dem der Erdkörper unter einem Bauwerk durch Überwinden der Scherfestigkeit des Bodens bricht und dadurch ein Teil des Bodens infolge des Bauwerksgewichtes unter dem Bauwerk weggedrückt wird. Die Schiefstellung des Turmes in Pisa – auch die in Suurhusen – hat diese Ursache. In Pisa wurde durch die beiden Baupausen der Grundbruch vermieden, der Boden konnte sich durch Auspressen des Wassers konsolidieren und jeweils danach neue Lasten aufnehmen. Es scheint also auch jetzt – wie im 12. bis 14. Jahrhundert – darum zu gehen, den „schleichenden“ Grundbruch zu vermeiden.

Auf der anderen Seite führen Setzungsdifferenzen z.B. eines inhomogenen Bodens (Abb. 40, rechts) oder unterschiedliches Nachgeben von Pfählen unter einem Bauwerk zu großen Beanspruchungen des Bauwerkes selbst. Bauingenieure beschäftigen sich daher heute zunehmend mit der Bauwerk-Boden-Wechselwirkung. In unserer Darstellung ist angenommen, daß sich die Innenbereiche der Gründungsfuge infolge Setzungen entlastet haben, so daß das Gewicht des inneren Turmteiles im Turm nach außen übertragen werden muß. Der daraus entstehende Schub kann u.U. vom Bauwerk – bei alten Türmen vom Mauerwerk – nicht mehr aufgenommen werden, führt zu vertikalen Rissen und schließlich zum Herausbrechen von Mauerwerksteilen (Pasewalk) oder zum Zusammenbruch (Venedig). In Venedig wurde kurz vor dem Zusammenbruch in der Mitte einer Turmseite ein relativ schnell vom Fundament nach oben wachsender Riß beobachtet.

Die wichtigste Voraussetzung zur Vermeidung von Schäden der beschriebenen Art sind umfangreiche und gründliche Untersuchungen des Bodens und dessen Beurteilung für die vorgesehene Baumaßnahme. Dies zu unterlassen, war früher wegen fehlender Möglichkeiten oft nicht vermeidbar, muß heute aber als leichtsinniges Sparen am falschen Ende eingestuft werden. Ob damit allerdings Folgen von Naturgewalten, wie die Schiefstellung eines Kirchturmes in St. Moritz (Abb. 41) durch einen Erdbeben sicher vermeidbar sind, muß wohl dahingestellt bleiben.



Abb. 41:
Schief stehender Kirchturm in
St. Moritz



▲ Abb. 42: Ansatz von Eis an einem Mast auf dem Feldberg im Taunus

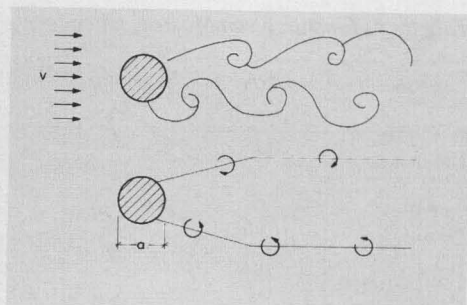


Abb. 43: Kármánsche Wirbelstraße im Strömungsnachlauf im unterkritischen Bereich

5 Einstürze von Masten

5.1 Übersicht über Einstürze in den letzten rd. 40 Jahren

Die Zusammenstellung des finnischen Ingenieurs J. Laiho, Finnish Broadcasting Co., Helsinki, (Tabelle 1) weist weltweit für die Zeit von 1959 bis heute 97 Zusammenbrüche oder schwere Schäden an Masten, z.T. auch an Türmen auf. Häufigste Ursache ist außergewöhnlicher Eisansatz (Abb. 42), gefolgt von Stürmen und Gewittern – angegeben werden dafür Windgeschwindigkeiten bis zu 260 km/h. Und auffallend hoch ist die Anzahl der Zerstörung von Masten durch Flugzeuganprall.

Die Zerstörung von Masten durch Querschwingungen setzt kreiszylindrische Mast-schäfte voraus. Bei ihnen führt die Wirbelablösung (Abb. 43) zu periodisch wirkenden Querlasten, die dann gefährlich werden, wenn ihre Frequenz mit einer Eigenfrequenz des Mastes übereinstimmt, also Resonanz vorliegt.

Heute hat man das Problem weitgehend im Griff, einfach, indem man auf Rohrmantelmaste verzichtet, oder dadurch, daß man gezielt die Schwingungen dämpft. Dies kann z.B. aerodynamisch durch Störung der glatten Oberfläche (Abb. 44) geschehen.

Periodische Wirbelablösungen an kreisförmigen Gebilden entstehen in der Natur in verschiedener Form. Im Kleinen kennen wir das „Singen“ von Freileitungen, da die Frequenz der Wirbelablösung im hörbaren Bereich liegt. Um die Erscheinung im Großen an kreisrunden Bergen zu beobachten (Abb. 45), muß man allerdings Weltraumfahrer sein und mit der Wetterlage Glück haben, damit sich die Wirbelablösung in einem Wolkenbild zeigt, wie hier leeseitig von einem kreisrunden Berg auf der Insel Jan Mayen, rd. 400 km nordöstlich von Island.

Tabelle 1: Einstürze von Masten, Übersicht

Ursache	USA/ Kanada	England	Finnland/ Schweden	Deutsch- land	Andere*	Summe
Eisansatz	17		3			20
Sturm, Gewitter	10		2		3	15
Fremdein- wirkung**	4	3	2	1	2	12
Montage	7		1	1		9
Querschwin- gungen	2	2	1	1	2	8
Konstruk- tion	1	1		3	3	8
Sabotage		4				4
Mangel bei Wartung	1					1
Unbekannt	19	1				20
Summe	61	11	9	6	10	97

* Argentinien, Australien, Belgien, Frankreich, Island, Luxemburg, Polen, Tschechien, Türkei

** vorwiegend Flugzeugberührungen



Abb. 44: Scrouton-Wendel zur aerodynamischen Dämpfung



Abb. 45: Kármánsche Wirbelstraße östlich eines runden Berges auf der Insel St. Mayen

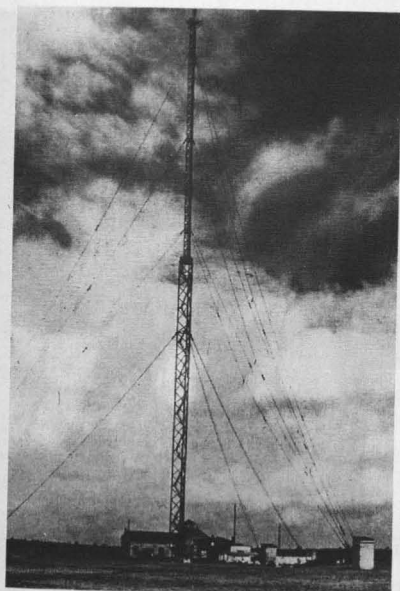


Abb. 47: Eingestürzter 300-m-Rohrmantelmast
des WDR im Teutoburger Wald

◀ Abb. 46: Mast Nauen nach Aufstockung
auf 200 m, 1912

5.2 Einsturz des 200-m-Mastes in Nauen 1912

Der erste Einsturz eines abgespannten Mastes in Deutschland geschah 1912 auf der Funkstelle Nauen nordwestlich von Berlin. Dort hatte man den zunächst 100 m hohen Mast zur Erhöhung der Sendeleistung auf 200 m aufgestockt (Abb. 46), man erkennt den oberen Teil mit schmalereem Schaft. Bald nach dem Umbau stürzte der Mast bei einem starken Sturm ein, er war für diese Höhe unterbemessen.

5.3 Einsturz des 300-m-Mastes Teutoburger Wald 1985

In einer kalten Nacht des Winters 1985/86 stürzte der 300 m hohe Rohrmantelmast des Westdeutschen Rundfunks ein (Abb. 47), ohne daß nennenswerter Wind herrschte. Als Ursache stellte sich der vermeintliche Trick eines Stahlbauschweißers heraus. Er ließ die Schottbleche zum Anschluß der Seile bewußt kleiner schneiden (Abb. 48), als sie in den Plänen vorgesehen waren, um sie leicht zwischen andere Bauteile einschieben zu können. Er beeinträchtigte damit die Qualität der für die Tragsicherheit entscheidenden Schweißnähte, indem der die vorgeschriebene Spaltbreite von 2 mm nicht einhielt und damit nachhaltige Mängel an der Schweißverbindung verursachte. So kam es über die Jahre infolge der Windlasten zunächst zu Anrissen, dann zu ihrer Ausweitung und schließlich bei tiefer Temperatur infolge der Abnahme der Zähigkeit des Stahles zum Durchschlag eines Risses.

Der Mast wurde in kürzester Zeit durch einen Stahlgittermast ersetzt (Abb. 49). Zu der wichtigsten Folge dieses Einsturzes gehörte die Überprüfung aller Maste aus derselben Werkstatt, bei denen der Schweißer ebenfalls Zaublerlehrling gewesen sein

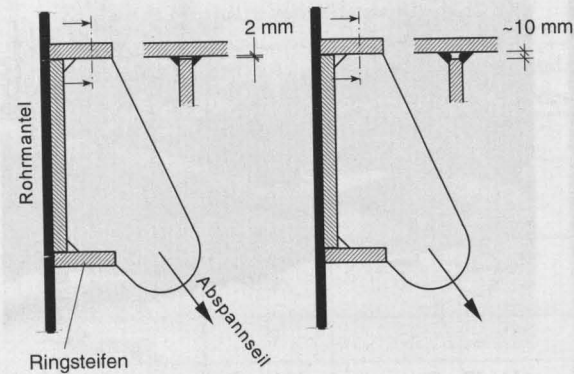
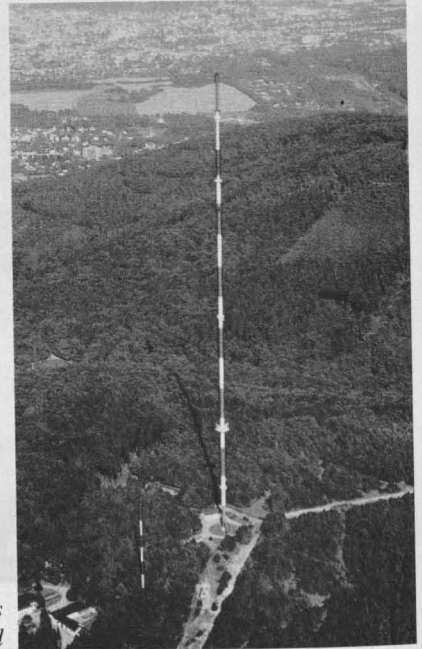


Abb. 48: Anschlußkonstruktion beim 300-m-Mast des WDR im Teutoburger Wald



► Abb. 49: Neuer 300-m-Gittermast des WDR im Teutoburger Wald

konnte. Die Kontrolle führte bei mehreren Masten zum Ersatz von Anschlußkonstruktionen, bei denen z.B. Rostabsonderungen Anlaß waren, Unsicherheiten nicht sicher ausschließen zu können.

6 Einstürze von Brücken

6.1 Zu den Triumphen der Brückenbauentwicklung

Der Bau von Brücken in Eisen, später in Stahl und in Beton ist von Anfang an durch das Überwinden immer größerer Spannweiten gekennzeichnet. Es beginnt

- vor mehr als 200 Jahren mit der ersten gußeisernen Bogenbrücke in Wales mit 31 m Spannweite (Abb. 2),
- überspringt in der ersten Hälfte des 19. Jahrhunderts mit mehreren Bauwerken die 100-m-Grenze,
- erreicht 1883 mit der Brooklynbrücke (Abb. 50) in New York fast einen halben Kilometer und
- hält seit 1937 mit den 1280 m der Golden Gate Brücke (Abb. 51) für viele Jahre den Spannweitenrekord.
- Der gewaltige Sprung auf 1990 m mit der Fertigstellung der Akashi-Hängebrücke zwischen den Inseln Honshu und Shikoku in Japan steht kurz bevor.

Dieser triumphalen Entwicklung stehen große Rückschläge entgegen. Der Einsturz der Brücke über den Forth of Tay ist leider nur eine von vielen großen Katastrophen.



Abb. 50: Brooklyn-Brücke in New York, 1883



Abb. 51: Golden Gate Brücke in San Francisco

6.2 Zu Auswirkungen des Taybrückeneinsturzes

Wie die Taybrücke, war auch die Brücke über den Firth of Forth durch den Bau des englischen Eisenbahnnetzes bedingt. Sie wurde 1873 von dem demselben Ingenieur, der die Taybrücke entworfen hatte, als Hängebrücke geplant [24] (Abb. 52), und der Bau wurde begonnen. 1879 brachte der Einsturz der Taybrücke – dies völlig unabhängig von der Qualität des Entwurfes – das Ende der Realisierung, obwohl bereits ein erster Pfeiler fertiggestellt war.

Gebaut wurde dann nach einem Entwurf von Fowler und Baker (Abb. 52), dem u.a. eine Steigerung der angesetzten Windlasten auf den 5fachen Wert zugrunde lag, mit dem Ziel, daß das Bauwerk [24] „das Vertrauen der Öffentlichkeit gewinnen sollte und sich des Ansehens nicht nur als die größte und kraftvollste, sondern auch als die steifste Brücke der Welt erfreuen müsse.“ Das Bauwerk wurde 1890 fertig (Abb. 53) und hielt 27 Jahre mit 521 m in beiden Hauptöffnungen den Spannweitenrekord im Brückenbau.

Wir stufen die Firth of Forth-Brücke in Kenntnis der durch den Taybrückeneinsturz gegebenen Situation, unter Würdigung der Bauzeit schon Ende des letzten Jahrhunderts

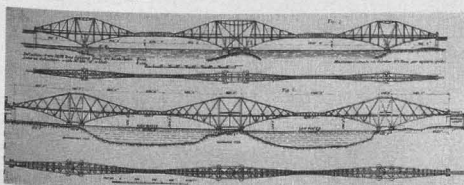


Abb. 52: Entwürfe für die Firth of Forth Brücke

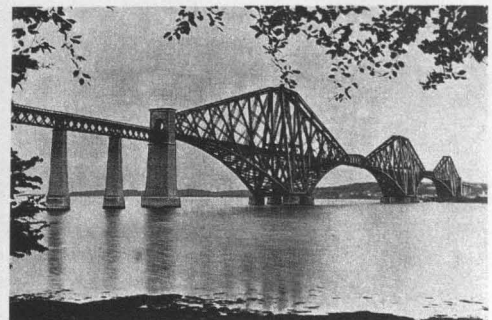


Abb. 53: Firth of Forth Brücke

und ihres Bestandes von inzwischen mehr als 100 Jahren als außergewöhnliche Ingenieurleistung ein. An ihrem ungewöhnlichen, ja archaischen Aussehen haben Fachleute immer wieder Anstoß genommen und sie als „das ungeschickteste Stück Ingenieurkunst, das je entworfen wurde“ oder als „die höchste Verkörperung allen Häßlichen“ [24] bezeichnet.

6.3 Montageeinsturz der Eisenbahnbrücke über St. Lawrence River bei Quebec in Kanada 1907

Eines der größten Desaster im Stahlbrückenbau war 1907 der Montageeinsturz der Quebecbrücke über den St. Lawrence River in Kanada [25]. Das Bauwerk erforderte in bezug auf die Spannweite (Abb. 54) – dies zusammen mit der Firth of Forth-Brücke – einen gewaltigen Sprung aus dem Erfahrungsbereich heraus [26].

Während des Baues stürzte die im Mittelfeld rd. 550 m weit zu spannende Eisenbahnbrücke, kurz nachdem sie den in Abb. 55 gezeigten Bauzustand erreicht hatte, ein. Die Katastrophe brachte 74 Arbeitern den Tod (Abb. 56).

Hauptursache für das Versagen war das Ausknicken eines mehrteiligen Druckstabes im Untergurt des landseitigen Feldes infolge zu schwacher Verbindungen der einzelnen Querschnittsteile miteinander. Grund für die Fehleinschätzung war das sprungartige Extrapolieren aus einem Parameterbereich, der durch Versuche abgesichert war, zu sehr

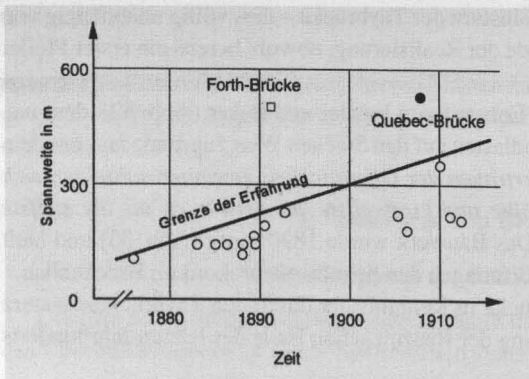


Abb. 54: Brückenspannweiten
zwischen 1870 und 1912

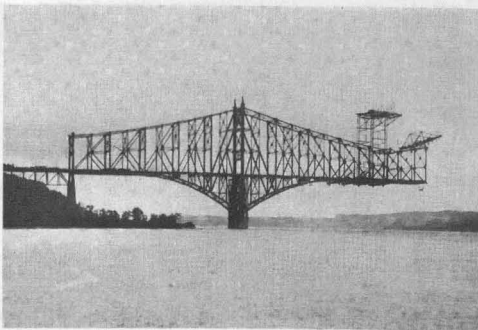


Abb. 55: Quebecbrücke vor dem Einsturz



Abb. 56: Quebecbrücke nach dem Einsturz

großen Querschnitten. Für diese waren und sind Versuche überhaupt nicht möglich. Daher heißt im Untersuchungsbericht u.a.: „Wir gehen von ... der gewöhnlichen Konstruktion, die in vielfacher Praxis ausprobiert wurde, zu enormen, schweren dickplattigen Stahlfeilern über **und wenden dieselben Gesetze an**“.

Der Wiederaufbau der Brücke begann 1913, und 1916 stürzte das letzte Brückenteil beim Anheben zum Einbau zwischen die beiden Kragarmspitzen durch Bruch eines nur für die Montage benötigten Gußeisenteiles in den Strom. Die Brücke wurde schließlich 1917 fertig und 1918 vom Bauherrn akzeptiert und in Betrieb genommen.

6.4 Montageeinsturz der Rheinbrücke Koblenz 1971

Im November 1971 stürzte die Straßenbrücke über den Rhein zwischen Koblenz und Horchheim beim Bau ein [27]. Es handelt sich um ein dreifeldriges Bauwerk mit einer Mittelspannweite von rd. 236 m (Abb. 57). Der Querschnitt ist ein großer trapezförmiger Kasten, oben 16,4 und unten 11,0 m breit, über den Pfeilern rd. 10 m und im Feld rd. 6 m hoch. Er besteht aus relativ dünnen Blechen und ist in Längsrichtung kräftig ausgesteift (Abb. 58, fotografiert nach dem Einsturz).

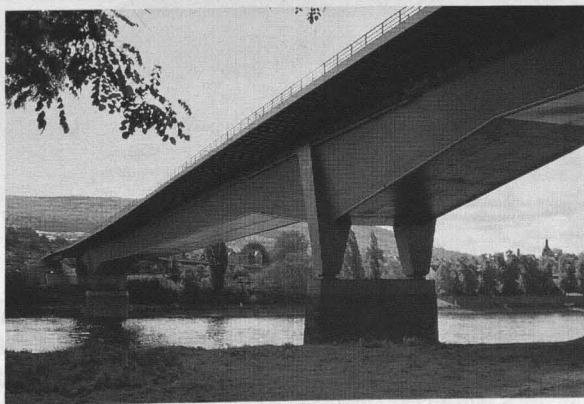


Abb. 57: Rheinbrücke Koblenz: Zustand nach Wiederaufbau

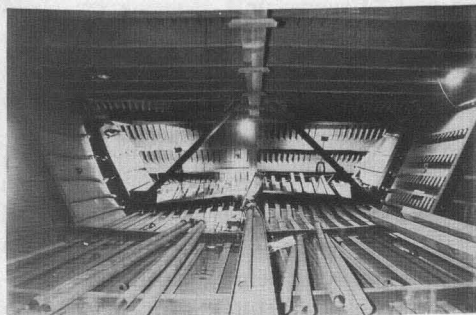
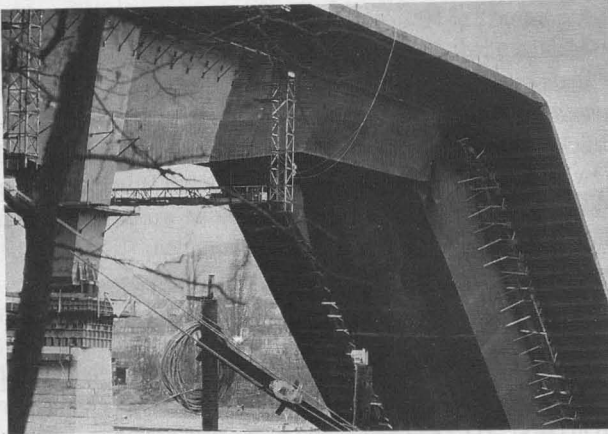


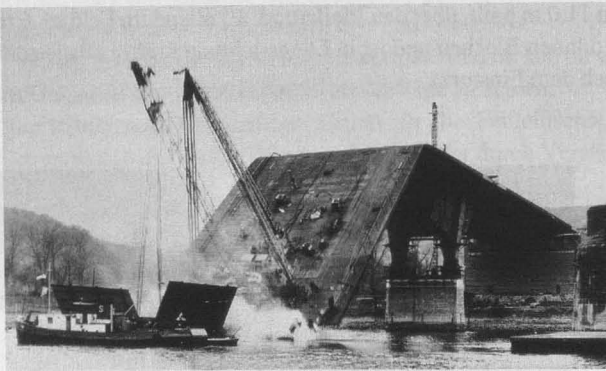
Abb. 58: Rheinbrücke Koblenz: Blick in den Kastenträger nach dem Versagen



Abb. 59: Rheinbrücke Koblenz: vor dem Anheben des unteren Teils des letzten Vorbauabschnittes auf der Westseite



*Abb. 60: Rheinbrücke Koblenz:
Querschnitt,
der versagt hat*



*Abb. 61: Rheinbrücke Koblenz:
Absturz des
Kragarmes*

Das Unglück geschah, nachdem bereits rd. 104 m des Mittelfeldes vom linken Strompfeiler auskragten und das Unterteil des nächsten und beim Vorbau von der linken Rheinseite zugleich letzten, rd. 17 m langen Teilstückes von einer Schute zum Anschluß an die Kragspitze angehoben wurde (Abb. 59). Durch die dabei übernommene Last wurde der Brückenträger im Bereich eines Stoßes rd. 54 m vom Pfeiler, d.h. rd. 50 m vom augenblicklichen Kragarmende entfernt, überbeansprucht und versagte (Abb. 60). Der halbe Kragarm knickte ab (Abb. 61), seine Spitze schlug auf dem Rheingrund auf. 13 Bauarbeiter kamen zu Tode, mehrere wurden verletzt.

Die Ursache für das Versagen des Stoßes im Bodenblech (Abb. 62) liegt in einer Fehleinschätzung seiner Tragfähigkeit: in einem aufwendigen, nur mit Hilfe von Computern möglichen Nachweis wurden Einflüsse, die die Traglast anheben – das sind die lokalen Einspannungen des Bleches in die Längssteifen – berücksichtigt, dagegen andere, die sie drücken – das ist hier der Verzug der Bleche beim Schweißen der Quernaht (b in Abb. 62) – nicht. Der einfache Überschlag ohne die Hilfe eines Computers, der beide Einflüsse als sich gegenseitig kompensierend einstufte, hätte ergeben, daß die Konstruktion nicht ausreichend war, wie es der Versuch (Abb. 63) bestätigt.

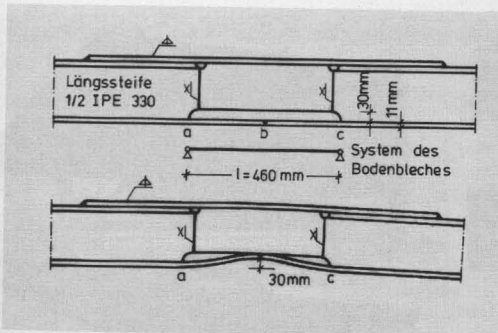


Abb. 62: Rheinbrücke Koblenz:
Stoßausbildung

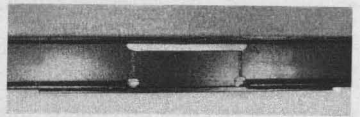
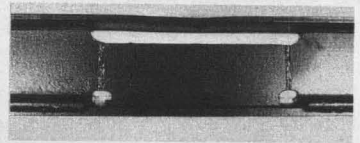
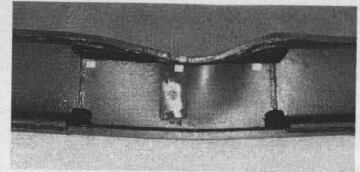
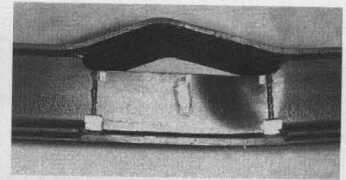


Abb. 63: Rheinbrücke Koblenz:
Verhalten des Stoßes im Versuch

Die kurzzeitige Häufung von Montageversagen von Stahlbrücken mit großen Kastenquerschnitten mit

- dem Einsturz der West Gate Brücke bei Melbourne in Australien und
- dem der Brücke über den Hafen von Milford in England,

beides 1970, und zuvor

- die Beschädigung der Wiener Donaubrücke 1969 (Abb. 64)

ließ international große Unsicherheit bei der Beurteilung ihrer Tragfähigkeit aufkommen. Sie erstreckte sich – nicht zuletzt durch die nicht von allen Fachleuten geteilten Feststellungen über die Ursachen – allgemein auf die Tragfähigkeit der immer mehr in Mode gekommenen Brückenquerschnitte aus dünnen, kräftig ausgesteiften Blechen (Abb. 65).

Die Unsicherheit wurde auch benutzt, um Gelder für die Forschung zu mobilisieren, obwohl alle Schadensfälle nach dem Urteil von manchen Kollegen – auch nach meinem – letztlich auf Mängel in Details der Konstruktion zurückgingen. Die Ergebnisse der Forschung haben aber erheblich dazu beigetragen, die für längere Zeit unangemessene Verschärfung von Baubestimmungen allmählich auf ein begründetes Maß zurückzuführen.

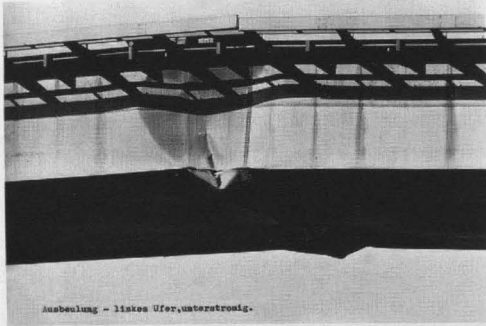


Abb. 64: Donaubrücke Wien:
Schaden am Hauptträger

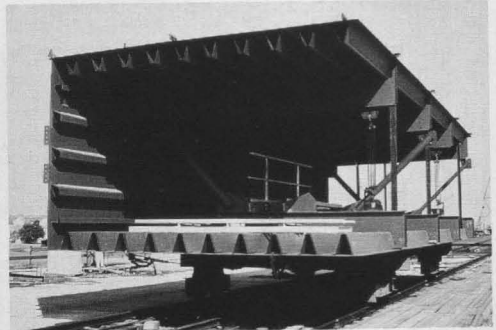


Abb. 65: Teil eines modernen Stahlbrücken-
querschnittes

6.5 Einsturz einer Fußgängergalerie im Hyatt-Hotel in Kansas City, Missouri, 1981

1981 starben beim Absturz einer Fußgängergalerie in die Lobby des Hyatt-Hotels in Kansas City (Abb. 66) 113 Menschen, und viele wurden schwer verletzt. Ursache war das Versagen eines im Grunde simplen Details, nämlich der Verbindung der Querträger der Brücke mit den Aufhängestangen (Abb. 67). Sowohl im Entwurf als auch in der davon abweichenden Ausführung wurden fundamentale Fehler gemacht und von Grundregeln für derartige Konstruktionen abgewichen [10, 28]. In beiden Fällen fehlten

- die üblichen Quersteifen an den Querträgern, um die auf die Flanschanten wirkenden Kräfte in die Stege zu leiten,
- die Scheiben unter den Schraubenmuttern, um die Kräfte an ihrer Einleitungsstelle auf eine hinreichend große Fläche zu verteilen und
- die Sicherungen der Schrauben, z.B. durch Kontern.

Die gegenüber der an sich schon mangelhaften Planung geänderte Ausführung hatte insofern gravierende Folgen, als damit nicht nur die Last aus der in Höhe der Verbindung



Abb. 66: Hyatt Hotel, Kansas City:
abgestürzte Besucherbrücken

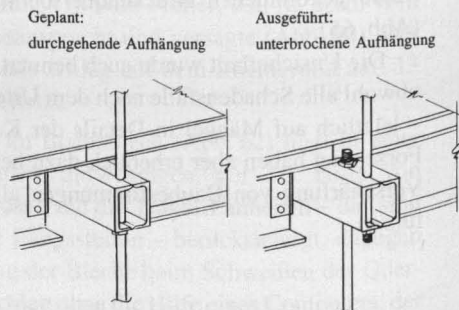


Abb. 67: Hyatt Hotel, Kansas City: Auf-
hängung der oberen Besucherbrücke

angeordneten Brücke selbst, sondern auch die aus der darunter liegenden Brücke über die im Bild vordere Verbindung übertragen werden mußte. Für die Ableitung dieser großen Kraft über die Flansche waren diese selbst und die Schweißnähte zu schwach.

7 Zusammenfassung

Vor über 3700 Jahren ließ Hammurabi, Kaiser von Mesopotamien, 280 Artikel des Straf- und Zivilrechtes in einer seinem Volk verständlichen Sprache in eine 2 m hohe Säule einmeißeln (Abb. 68). Die Konsequenzen für das Verursachen von Schäden waren nach dem Grundsatz „Gleiches mit Gleichem vergelten“ klar geregelt, z.B. so, wie es in der Übersetzung für einen der möglichen Fälle in Abb. 68 angegeben ist. Ob die Gesetze des Hammurabi geholfen haben, Schäden an Bauwerken, Einstürze und Tote zu verhindern oder zumindest einzuschränken, ist nicht überliefert.

Wenn man die Ursachen von Bauwerkseinstürzen analysiert, kommt man zu dem Ergebnis, daß es kaum einen Fall gibt, der durch genauere Berechnungen verhindert worden wäre. Vielmehr sind die meisten Katastrophen darin begründet, daß entweder Möglichkeiten des Versagens überhaupt nicht in Betracht gezogen, Bedingungen nicht ausreichend erkundet oder in verschiedenartiger Weise Unbedachtsamkeit oder sogar Leichtsinns beim Entwurf oder bei der Ausführung herrschten.

Man bekommt daher auch Zweifel, ob mit der die neuen Normen bestimmenden, auf Wahrscheinlichkeitsbetrachtungen aufgebauten Sicherheitstheorie Bauschäden und

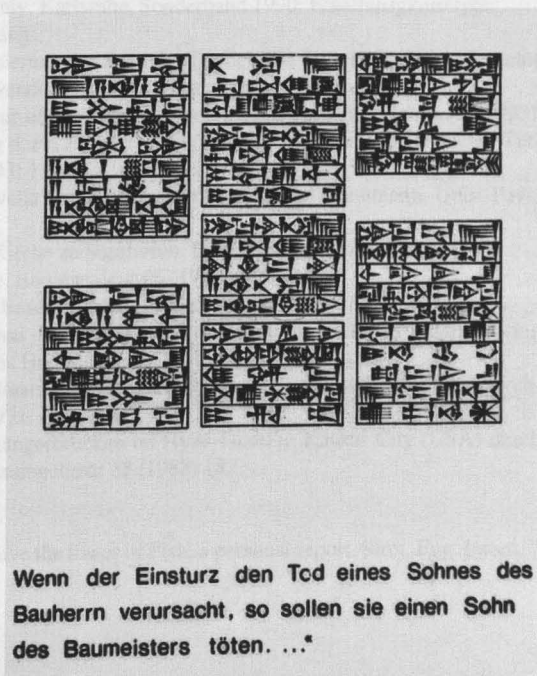


Abb. 68: Aus dem Codex Hammurabi (1760 v. Chr.)

-einstürze reduziert werden können. Denn deren Ursachen sind nicht statistisch verteilt, sie sind vielmehr grobe Fehler, die sich einer Erfassung durch die Wahrscheinlichkeitsrechnung entziehen.

Wenn man dies bedenkt und sich bewußt macht, worum wir uns in der Bauwissenschaft bemühen, wird man unsicher, ob wir damit zur Verminderung von Bauwerkseinstürzen nachhaltig beitragen. Man ist geneigt, den vor mehr als 100 Jahren von George Frost, dem damaligen Herausgeber von Engineering News in den USA, gemachten Äußerungen zuzustimmen [25] *„Falls wir die Möglichkeit dazu hätten, könnten wir leicht die interessanteste, lehrreichste und höchstgeschätzte Ingenieurzeitschrift der Welt herausgeben, wenn wir sie nur einer bestimmten Klasse von Tatsachen widmen würden, nämlich dem Verzeichnis der Fehlschläge ...*

Denn das, was zu Recht Ingenieurwissenschaft genannt wird, baut auf solchen Aufzeichnungen auf.“

In diesem Sinn habe ich meine Darlegungen als Beitrag zur Ingenieurwissenschaft konzipiert.

Allen Kollegen und Freunden, die mir bei der Materialsammlung und bei der Herstellung von Bildmaterial geholfen haben, danke ich für ihre Unterstützung vielmals.

Literatur

- [1] M. Eyth: Hinter Pflug und Schraubstock. Stuttgart: DVA 1976
- [2] J. Scheer: Extrapolieren: Zwang und Risiko für Bauingenieure. Abh. der Braunschw. Wiss. Ges. XLV (1994) 45–68
- [3] R. Stadelmann: Die ägyptischen Pyramiden. Mainz. Verlag Ph. v. Zabern 1985. – Erschienen als Band 30 in: Kulturgeschichte der antiken Welt.
- [4] Lexikon der Ägyptologie, Band IV.
- [5] K. Mendelssohn: Das Rätsel der Pyramiden. Deutsche Übersetzung Berg. Gladbach: Lübbe Verlag 1974
- [6] K. Mendelssohn: Gedanken eines Naturwissenschaftlers zum Pyramidenbau. Physik in unserer Zeit 3 (1972) 41–47
- [7] Harz. Merian Heft XXVI, Heft 11
- [8] J. G. Kirchner: Das Reichsstift Walkenried. Eigenverlag, etwa 1956
- [9] J. G. Leuckfeld: Antiquitates Walckenredenses. Leipzig, Nordhausen 1705
- [10] J. Scheer: Gutachten für die Staatsanwaltschaft Koblenz – Rheinbrücke Koblenz-Horchheim, Schadensfall vom 10. XI. 1971. Karlsruhe 1972
- [11] Kaminetzky: Design and construction failures. New York: McGrawHill 1991
- [12] K. Dierks: Kletterschalungseinsturz in West Virginia. Bauingenieur 54 (1979) 57–58
- [13] J. H. Davis: Venedig. Wiesbaden: Ebeling Verlag 1976
- [14] W. Knappe: In Siebenbürgen. Leipzig: F. A. Brockhaus 1982
- [15] Dokumente 4 (1994) 43
- [16] H. Elze: Ausgewählte Bauschäden in der DDR. Friedrichsthal: Manuskript eines Vortrages 1996 und W. Brose et al.: Pasewalk, eine vorpommersche Stadt sowie Pasewalk, Bilder aus Vergangenheit und Gegenwart. Leipzig: Leipz. Verlagsges. 1993
- [17] L. Demps: Der schönste Platz Berlins. Berlin: Henschel 1993
- [18] G. Gudehus: Zum bodenbedingten Einsturz historischer Bauwerke. In: Erhalten historisch bedeutender Bauwerke. SFB 315, Univ. Karlsruhe, Sonderband 1990: Erhaltungskonzepte
- [19] F. Leonhardt: Persönliche Mitteilung
- [20] Hoff, H.: Maßnahmen zur Stabilisierung des Schiefen Turmes von Pisa. Hildesheim: Berichte zu Weihnachten 1996 (unter Verwendung von Unterlagen von F. Leonhardt)
- [21] L. Sanpaulesi: Structural behaviour of the leaning tower, Pisa. Struct. Eng. Intern. 3 (1993), Nr. 1, 20–21 (s. auch Kurzfassung dazu: J. Scheer: Provisorische Sicherung des Schiefen Turmes in Pisa. Bauingenieur 68 (1993) 190)
- [22] G. Macchi: Ruolo della Scienza nella conservazione strutturale dei monumenti. Univ. Pavia 1994
- [23] Druckschrift der Evang.-reform. Kirche zu Suurhusen: Der schiefste Kirchturm der Welt.
- [24] W. Lorenz: 100 Jahre Forthbrücke. Bauingenieur 66 (1991) 416–418
- [25] E. S. Ferguson: Das innere Auge. Basel: Birkhäuser Verlag 1993
- [26] D. Blockley: The nature of structural design and safety. Ellis Horwood series in engineering science. Chichester (England): Ellis Horwood Ltd., 1980
- [27] O. Steinhardt: Gutachten für die Staatsanwaltschaft Koblenz – Rheinbrücke Koblenz-Horchheim, Schadensfall vom 10. XI. 1971. Karlsruhe 1972
- [28] G. v. d. Hagen: Einsturz der Fußgängerbrücken im Hyatt-Hotel in Kansas City (USA) durch Konstruktionsfehler verursacht. Bauingenieur 58 (1983) 182

Nach dem Vortrag erschien:

- [29] F. Leonhardt: The Committee to save the tower of Pisa: a personal report. Struct. Eng. Intern. 7 (1997) 201–212

Bildquellen

- 1 G. Buchheim, R. Sonnemann (Hrsg.): Geschichte der Technikwissenschaften. Leipzig: Edition Leipzig 1990
- 2, 16 N. Hawkes: Wunderwerke. Die großen Konstruktionen. Augsburg: Weltbild Verlag 1994
- 4 Swedish National Road Administration: Tjörn Bridge. Adlink 1984
- 6 Unter Verwendung von [3] bis [6]
- 8 Nach [4]
- 9, 11, 13, 15 [3]
- 10, 14 [6]
- 12 Kestner-Museum Hannover
- 17 Baudenkmale in Niedersachsen. Hannover: Schlütersche Verlagsanst. 1990
- 18, 53 H. Wittfoht: Triumph der Spannweiten. Düsseldorf: Beton-Verlag 1972
- 19 Bundesmin. f. Verkehr: Schäden an Brücken und anderen Ingenieurbauwerken. Dortmund: Verkehrsblatt-Verl. 1982
- 27 H.-G. Olshausen (Hrsg.): Lexikon Bauingenieurwesen. Düsseldorf: VDI-Verlag 1991
- 28 [12]
- 29, 66, 67 [11]
- 30, 36 E. Heinle, F. Leonhardt: Türme aller Zeiten – aller Kulturen. Stuttgart: DVA 1988
- 31 M. Welder: Siebenbürgen, Entdeckungsreise in Bildern. Leer: Rautenberg Verl. 1992
- 32 P. Wolff: Drei Kaiserdome. Mainz: Verlag Der Eiserne Hammer
- 33, 34 [16]
- 35 [17]
- 37 [18]
- 38 [20]
- 39 [23]
- 45 O. Wenderath: Messungen auf einem Funkturm. Messtechnische Berichte 17 (1981), H.3., Seite 11
- 46 Stadtarchiv Nauen
- 47 Werksfoto ABB Mannheim
- 49 WDR, Köln
- 52 [24]
- 54 [26]
- 55, 56 [25]
- 58, 59, 61, 63 [27]
- 3, 24, 41, 50, 51, 64 Fotograf unbekannt, alle anderen: Verfasser